

**Філімоніхін Г.Б.**  
**Коваленко О.В.**  
*Кіровоградський*  
*національний технічний*  
*університет*

**УДК 62-752+62-755**

## **ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЗРІВНОВАЖЕННЯ АВТОБАЛАНСИРАМИ ДИСКІВ РУЧНИХ ШЛІФУВАЛЬНИХ МАШИН**

*Исследован процесс уравнивания на холостом ходу дисков ручных шлифовальных машин разными типами шаровых автобалансиров. Установлена наибольшая пригодность автобалансиров с подвижными и неподвижными перегородками.*

*Is investigated the process of an equilibration idling disks of manual grinding machines by different types of ball-type autobalancers. The greatest suitability of autobalancers with mobile and fixed partitions is established.*

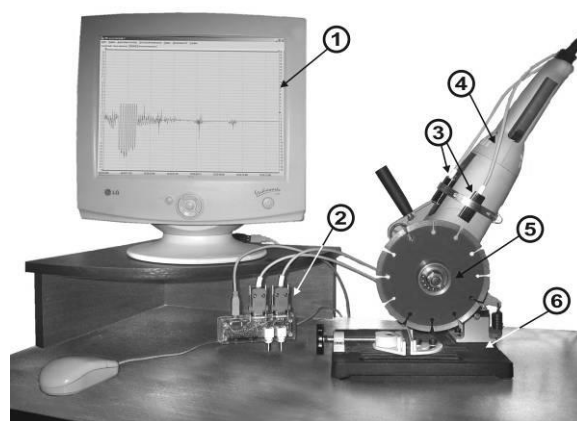
**Вступ.** Пасивні автобалансири (АБ) знайшли застосування для зрівноваження на ходу дисків ручних шліфувальних машин (РШМ) [1-5]. Умови настання автобалансування теоретично визначалися в роботах [1,3-5]. В роботах [3,4] експериментально оцінювалося зменшення вібрацій РШМ при застосуванні кульових АБ. При цьому ефективність роботи АБ оцінювалася опосередковано – через зменшення віброприскорення (віброшвидкості) на ручці РШМ – відповідно ГОСТ Р 51376.4-99 [7]. В наведених роботах експериментально не досліджувалася безпосередня робота АБ, зокрема не досліджувався рух куль відносно диска в режимах розгону, різання і вибігу ротора, не досліджувалася точність зрівноваження дисбалансу, чутливість куль АБ до дисбалансу тощо.

У роботі [6] розроблені кульові АБ нової конструкції, призначені для зрівноваження роторів із похилою віссю обертання. Зроблена оцінка різних способів встановлення АБ на шпиндель РШМ. Наведені алгоритми розрахунків основних параметрів як звичайних, так і запропонованих АБ. Розглянуті основні параметри стендів для проведення експериментальних досліджень.

В даній роботі описані розроблені стенди, методика перевірки якості виготовлення та встановлення АБ, алгоритми визначення властивостей АБ та результати дослідження роботи різних типів кульових АБ на холостому ходу РШМ.

### **§1. Опис стенду.**

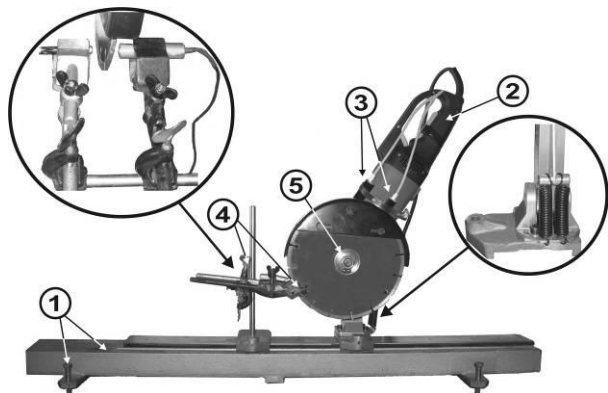
**Загальний опис стенду.** Для перевірки ефективності роботи різних типів АБ були розроблені два стенди. Перший – на базі КШМ середньої потужності фірми Einhell 125 (Німеччина, рис.1.1). Він складається з монітора 1, блока керування 2, датчиків 3, КШМ 4, АБ 5, станини 6. Другий стенд розроблений на базі КШМ великої потужності Expert (Німеччина, рис.1.2). Він складається з станини 1, КШМ 2, датчиків 3 та 4, АБ 5.



**Рисунок 1.1 - Дослідницький стенд на базі КШМ Einhell 125**

Стенди дозволяють змінювати дисбаланс диска КШМ, визначати частоту обертання диска за допомогою стробоскопа-тахометра DA-5100 або тахометра ЦАТ 3М, спостерігати за відносними рухами куль за допомогою DA-5100 або стробоскопа MULTITRONICS SC/10,

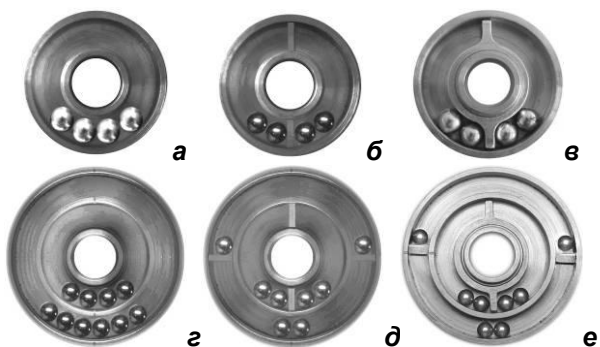
фіксуючи рух за допомогою відеокамери Panasonic RV550, вимірювати рівень вібрації системи за допомогою датчиків віброприскорень ADXL150/ADXL250, які вимірюють вібрації у заданій площині і з'єднані з персональним комп'ютером через аналогово-цифрову плату ADXL202EB-232A з USB інтерфейсом.



**Рисунок 1.2 - Дослідницький стенд на базі КШМ Expert**

На стендах можна досліджувати роботу АБ під час різних технологічних операцій – різання, шліфування, полірування.

**Загальний опис моделей АБ.** За розрахунками були спроектовані і виготовлені дві універсальні дослідні моделі кульових АБ. Перша модель розроблена конструктивно таким чином, що одночасно може використовуватися як звичайний АБ (рис.1.3,а), АБ з фіксованою перегородкою (рис.1.3,б), та АБ з рухомою перегородкою (рис.1.3,в).



**Рисунок 1.3 – Фото дослідних моделей кульових АБ**

Друга модель представляє собою двохрядний АБ з можливістю використання як звичайного двохрядного АБ (рис.1.3,г), АБ з фіксованими перегородками (рис.1.3,д), АБ з комбінованими перегородками (рис.1.3,е), та при видаленні куль з зовнішньої доріжки забезпечується перетворення другої моделі на однорядний АБ з можливостями першої моделі. У виготовлених АБ є можливість змінювати

кількість і розміри куль, та сили в'язкого тертя, що діють на кулі і рухому втулку з перегородками.

## **§2. Налаштування стенду.**

**1. Перевірка радіального і торцевого биття бігових доріжок.** Після встановлення АБ на ротор КШМ необхідно перевірити якість його виготовлення, а саме радіальне і торцеве биття. Для цього використовується багатообертовий індикатор переміщень з ціною вимірювання 0,01 мм, жорстко закріплений на штативі.

Для якісної роботи АБ радіальне і торцеве биття не повинне перевищувати 0,01 мм.

Для виготовлених моделей АБ торцеве биття складало 0,01 мм, радіальне 0,03 мм, що перевищує допустиме значення.

**2. Правка форми бігової доріжки.** Для виправлення форми бігової доріжки та зменшення радіального биття АБ КШМ була розроблена така методика.

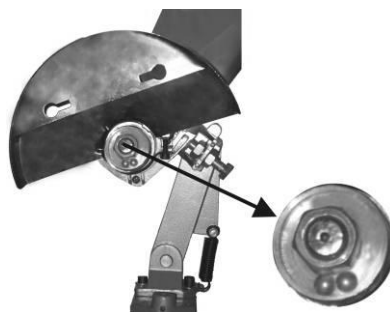
- 1) Встановлення АБ на ротор КШМ, з нанесенням відміток на ротор та АБ (для подальшої фіксації АБ в одному і тому ж положенні).
- 2) Жорстке закріплення КШМ на станині токарного верстату.
- 3) Вмикання КШМ і вигладжування бігової доріжки інструментом з використанням механізму подачі верстату.
- 4) Перевірка результатів.

Після правки форми бігової доріжки коливання стрілки індикатора стали меншими за 0,01 мм.

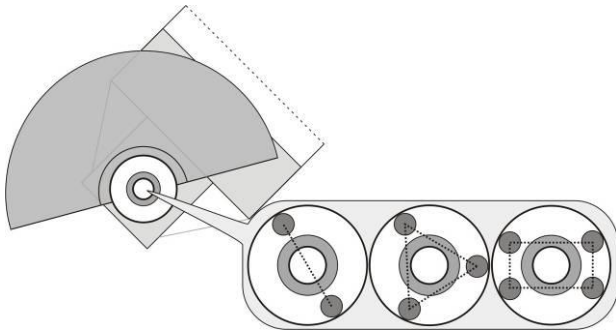
## **3. Зрівноваження корпусу АБ.**

Перевіряється зрівноваженість АБ та усувається статичний дисбаланс, який виникає при виготовленні корпусу АБ.

Для перевірки зрівноваженості на КШМ встановлюється АБ без диска (рис.2.1). В АБ послідовно розміщуються дві, три, чотири кулі. КШМ запускається і за допомогою фотозйомки зі спалахом визначається положення куль. При зрівноваженому АБ дві кулі повинні встати одна навпроти одної (рис.2.2), три кулі - створити рівнобічний трикутник, чотири - прямокутник.



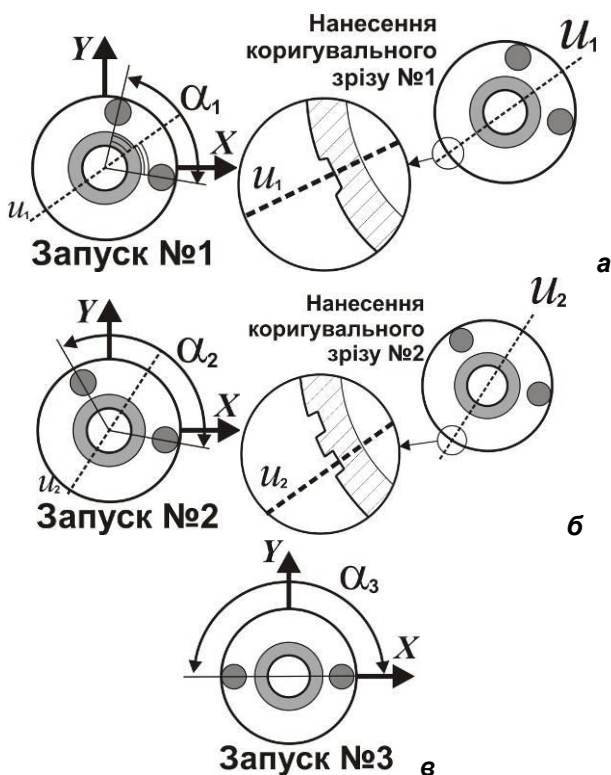
**Рисунок 2.1 – Перевірка зрівноваженості АБ**



**Рисунок 2.2 – Положення куль при відсутності дисбалансу**

Якщо в двохкульовому АБ кулі розташовуються під певним кутом, який не дорівнює  $180^\circ$ , то треба підібрати такий дисбаланс, щоб кулі зайняли діаметрально протилежне положення. Дисбаланс можна усунути шляхом зрізу на поверхні АБ за допомогою дискової фрези. Нижче наведений алгоритм відповідних дій.

Алгоритм 2.1 - Статичне зрівноваження АБ КШМ (рис. 2.3)



**а – запуск №1 та нанесення коригувального зрізу; б – запуск №2 та нанесення коригувального зрізу; в- запуск №3 - перевірка.**

**Рисунок 2.3 – Статичне зрівноваження корпусу АБ за алгоритмом 2.1**

- 1) Запускаємо КШМ з АБ без диска, і визначаємо кут між кулями. Якщо кут

становить  $\alpha = 180^\circ$ , то зупиняємось, інакше виконуємо п. 2.

- 2) Визначаємо необхідну масу коригувального зрізу.

$$m_k = S_{ui} / L, \quad (2.1)$$

де  $S_{ui}$  - дисбаланс, створюваний кулями,

$$S_{ui} = 2mR \cos(\alpha_n / 2);$$

$L$  - відстань від центра ротора до коригувального зрізу;

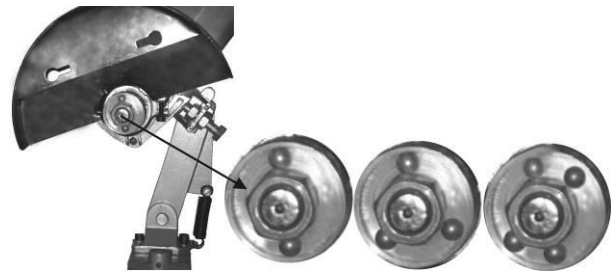
$m$  - маса кулі;

$R$  - відстань від центра мас кулі до центра ротора.

- 3) Проводимо вісь, що проходить через центр обертання ротора і розташована симетрично щодо куль. За допомогою дискової фрези здійснюємо коригувальний зріз на поверхні АБ, на лінії  $u_i$  протилежно кулям.

- 4) Переходимо до п. 1.

За алгоритмом 2.1 був усунений початковий дисбаланс АБ (рис. 2.4).



**Рисунок 2.4 – Результати усунення статичного дисбалансу АБ**

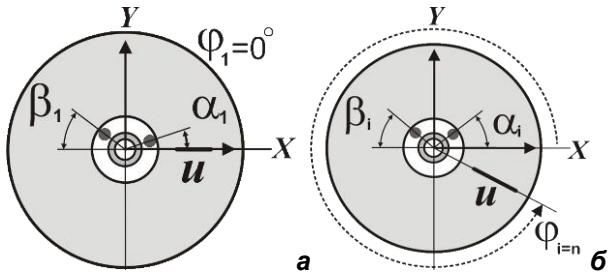
### §3. Визначення загальних властивостей АБ.

**1. Визначення розкиду дисбалансу від переустановки диска.** Мета експерименту - визначити, як буде змінюватися дисбаланс диска від переустановки на КШМ.

Зміст експерименту наступний. На КШМ декілька разів встановлюється один і той же диск у різних положеннях щодо ротора КШМ. На ротор КШМ насаджується у одному і тому ж положенні АБ із двома кулями. Після кожної установки машина запускається і визначаються положення куль щодо диска. Для цього диск розмічається, і кути, що визначають положення куль, визначаються відносно одних і тих же осей на диску. За розкидом цих положень оцінюється зміна дисбалансу в залежності від переустановки диска. Алгоритм наступний.

Алгоритм 3.1 – Визначення розкиду дисбалансу в залежності від переустановки диска (рис.3.1)

- 1) Введення розрахункових даних:  $n$  - кількість запусків,  $i = 1$  - номер першого запуску,  $m$  - маса кулі,  $R$  - відстань від центра мас кулі до ротора КШМ,  $K = 360/n$  град, крок повороту диска.



**а – перший крок повертання диска;  
б - останній крок повертання диска.**  
**Рисунок 3.1 Визначення розкиду дисбалансу диска від його переустановки**

2) Повертання диска КШМ на кут  $\varphi_i = K(i-1)$ .

3) Пуск КШМ №  $i$ . Заміряємо кути  $\alpha_i, \beta_i$  положення куль відносно диска.

4) Проектуємо геометричні центри куль на осі  $X, Y$

$$X_i^1 = -R \cos \alpha_i \quad X_i^2 = -R \cos \beta_i$$

$$Y_i^1 = R \sin \alpha_i \quad Y_i^2 = R \sin \beta_i. \quad (3.1)$$

5) Визначаємо дисбаланс куль відносно осей  $X$  і  $Y$

$$S_{xi} = m(X_i^1 + X_i^2) \quad S_{yi} = m(Y_i^1 + Y_i^2). \quad (3.2)$$

6) Визначаємо сумарний дисбаланс

$$S_i = \sqrt{S_{xi}^2 + S_{yi}^2}. \quad (3.3)$$

7) Якщо  $i < n$ , то  $i = i + 1$  та повертаємось до п. 2, інакше продовжуємо розрахунки.

8) Визначаємо середній дисбаланс куль відносно осей  $X$  і  $Y$

$$S_{xc} = \sum_{i=1}^n S_{xi} / n \quad S_{yc} = \sum_{i=1}^n S_{yi} / n. \quad (3.4)$$

9) Визначаємо середній сумарний дисбаланс

$$S_c = \sum_{i=1}^n S_i / n. \quad (3.5)$$

10) Визначаємо відхилення дисбалансу від середнього значення по осям  $X$  і  $Y$

$$\Delta S_{xi} = |S_{xi} - S_{xc}| \quad \Delta S_{yi} = |S_{yi} - S_{yc}|. \quad (3.6)$$

11) Визначаємо відхилення сумарного дисбалансу від середнього значення за абсолютною величиною і у відсотках:

$$\Delta S_i = \sqrt{\Delta S_{xi}^2 + \Delta S_{yi}^2}, \quad (3.7)$$

$$\eta_i \% = (\Delta S_i / S_c) \cdot 100\%. \quad (3.8)$$

12) Визначаємо середнє відхилення сумарного дисбалансу від середнього значення за абсолютною величиною і у відсотках:

$$\Delta S = \sum_{i=1}^n \Delta S_i / n. \quad (3.9)$$

$$\eta \% = (\Delta S / S_c) \cdot 100\%. \quad (3.10)$$

Відхилення дисбалансу склало від 5% до 27%, середнє відхилення 21 %.

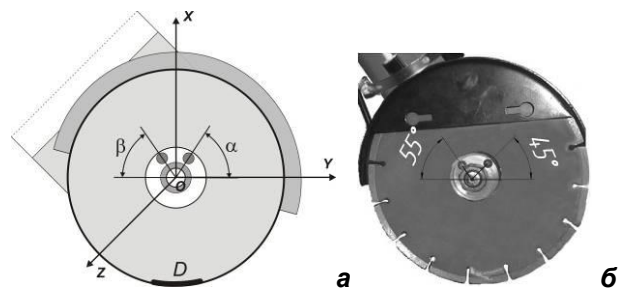
## 2. Визначення точності зрівноваження диска АБ.

### 2.1 Метод повторних перезапусків.

Зміст експерименту наступний. На КШМ встановлюється диск і АБ. Усередину АБ встановлюються дві кулі. Машина декілька разів перезапускається. Після кожного запуску, із допомогою фотозйомки із спалахом, визначаються відносні положення куль. Ці положення відповідають одному і тому ж незрівноваженому диску. Тому за розкидом цих положень можна оцінити точність зрівноваження диска АБ.

Алгоритм 3.2 подібний до алгоритму 3.1, тільки п.2 не виконується.

За допомогою алгоритму встановлено середня чутливість 10%, найгірша 16%.



**а – схема, б – оброблена фотографія**  
**Рисунок 3.2 – Визначення кутів розташування куль**

### 2.2 Метод ділення дисбалансу навпіл.

Експеримент полягає у наступному. На КШМ встановлюється диск і звичайний АБ. Усередину АБ встановлюються дві кулі. На диску фіксується початкова пробна маса. Після кожного запуску перевіряється реагування куль. Пробна маса зменшується, поки кулі на це реагують. Чутливість обчислюється за формулою.

$$\eta_{c\%} = (m_p / m_{\max}) \cdot 100. \quad (3.11)$$

де  $m_p$  - мінімальна пробна маса, на яку реагує АБ.

$m_{\max}$  - максимальна маса, що відповідає ємності АБ.

Встановлена чутливість АБ – 16,7% (1/6 від балансувальної ємності АБ).

## §4. Дослідження роботи різних типів кульових АБ на холостому ході РШМ.

### 1. Звичайний АБ, однорядний і двохрядний.

**Режим пуску КШМ.** Рух куль відносно диска істотно залежить від сил в'язкого опору, що діють на кулі при відносному русі. При малих силах кулі не розганяються і весь час знаходяться у нижній частині корпуса АБ. Деяке збільшення сил опору призводить до

появи квазіперіодичного руху, у якому кулі зібрані до купи і рухаються по біговій доріжці – відстають від ротора. Подальше збільшення сил опору призводить до довгого розгону куль протягом 5÷7 с. При цьому кулі достатньо рухливі і добре реагують на зміну дисбалансу диску. При великих силах в'язкого опору кулі розганяються за 3-5 с. Але їх рухливість відносно диска – незначна. Часто виникає залипання куль (застій), у наслідку чого значно погіршується реакція куль на дисбаланс.

Під час розгону ротора кулі збираються до купи і рухаються по біговій доріжці в сторону, протилежну обертанню диска, доки не розганяються з ним до робочої частоти обертання диска. При цьому вібрації корпусу РШМ більші за вібрації, які виникають без АБ, тобто АБ збільшує вібрації.

**Крейсерський режим.** При досягненні диском робочої частоти обертання кулі самі приходять у положення, в якому зрівноважують диск і далі обертаються з ним як одне ціле.

**Режим вибігу.** При гальмуванні диска кулі збираються разом і рухаються – випереджають диск. Але з часом вони припиняють відносний рух через дію на них сил в'язкого опору. Збираючись до купи кулі вносять значний дисбаланс до системи. Двохрядний АБ працює аналогічно.

Недоліком звичайного АБ є те, що при різкому гальмуванні або пуску КШМ, кулі збільшують вібрацію, збираючись разом чим вносять значний дисбаланс до системи. Мاستило, яке застосовують в АБ, згодом може привести до застою куль і зменшенню точності зрівноважування дисбалансу, якщо в'язкість мастила велика, та не забезпечити нормальний розбіг куль, якщо в'язкість мастила замала.

**2. Дослідження роботи кульового АБ з фіксованими перегородками, однорядний і двухрядний.**

Під час розгону диска кулі під дією тангенціальних сил рухаються по біговій доріжці в сторону, протилежну обертанню диска, доки не досягнуть перегородок, після чого вони зупиняються по відношенню до диска і далі розганяються разом з ним до робочої частоти обертання диска. При цьому відбувається спокійний розгін куль і диска, бо кулі займають симетричне положення щодо диска, чим не вносять додаткового дисбалансу до системи. Тривалість розгону куль мінімальна (0,5÷1 с) і дорівнює швидкості розгону диска. Розгін відбувається при будь-якої в'язкості, але невеликі сили опору забезпечують найбільшу рухливість куль і найбільшу точність зрівноваження дисбалансу.

При досягненні диском робочої частоти обертання майже миттєво відбувається автобалансування. При різкій зміні швидкості

обертання кулі виходять на перегородки й займають симетричне положення щодо диска, при цьому не вносячи додаткового дисбалансу. Недоліком даного АБ є асиметрія балансувальної ємності у різних радіальних напрямках.

При гальмуванні ротора все відбувається як і при розгоні, тільки у зворотному порядку, завдяки чому відбувається спокійний вибіг диска. Двохрядний АБ працює аналогічно але має більшу симетрію балансувальної ємності.

**3. Дослідження роботи кульового АБ з рухомими перегородками.**

Розгін куль в АБ відбувається подібно до АБ з нерухомими перегородками. Кулі досягають перегородок, з'єднаних з рухомою втулкою, після чого вони розганяються разом із втулкою (яка дещо відстає від диска) при будь-яких силах в'язкого опору, діючих на кулі. Це забезпечують сили в'язкого опору, що діють на втулку. Час розгону куль складає 1÷2 с. При малих силах опору кулі найбільш рухливі і найкраще реагують на дисбаланс.

При досягненні ротором робочої частоти відбувається автобалансування. Якщо перегородка опиняється на шляху кулі, то остання її пересуває до потрібного положення. Але іноді перегородка витісняє кулю з потрібного положення.

Гальмування ротора подібне до гальмування ротора з нерухомими перегородками.

Недоліком АБ є можливе уведення куль з положення рівноваги втулкою під час різання, що відбувається дуже рідко.

**4. Дослідження роботи двухрядного кульового АБ з комбінованими перегородками.**

Комбінований АБ має ті ж самі переваги і недоліки, що і однорядний АБ з нерухомою перегородкою, але має більшу симетрію та балансувальну ємність. Недоліком АБ є можливість уведення куль втулкою з положення рівноваги під час технологічної операції.

#### **§5. Виміри вібрації КШМ**

Були заміряні вібрації корпусу КШМ у площині YOX (рис.3.2,а) за допомогою датчика віброприскорень.

На рис.5.1 приведена осцилограма віброприскорень корпусу КШМ без диску та куль в АБ. Вона характеризується невеликою амплітудою -  $a_0 = 3,92 \text{ м/с}^2$ .

На рис. 5.2 показана осцилограма віброприскорень корпусу КШМ після встановлення диску з дисбалансом (4,9 г). Осцилограма показує значне збільшення амплітуди – до  $a_{\max} = 7 \text{ м/с}^2$ .

На рис.5.3 приведена осцилограма віброприскорень корпусу КШМ при максимальному дисбалансі з чотирма кулями в

АБ. Вона характеризується відносним зменшенням амплітуди віброприскорень –  $a = 4,41 \text{ м/с}^2$ .



**Рисунок 5.1 - Осцилограма вібрації КШМ без диска та затискного фланця**



**Рисунок 5.2 - Осцилограма вібрації КШМ з диском та дисбалансом**



**Рисунок 5.3 - Осцилограма вібрації КШМ з диском, АБ та дисбалансом**

Ефективність від установки АБ складає

$$e\% = [(a_{\max} - a) / a_{\max}] \cdot 100\% = [(7 - 4,41) / 7] \cdot 100 = 37\% \quad (3.12)$$

### Висновки

- 1) Для зрівноваження дисків РШМ можна використовувати звичайні АБ і АБ з рухомими і нерухомими перегородками.
- 2) Перед початком застосування АБ доцільно проводити правку форми бігової доріжки АБ на самій КШМ, що практично усуває биття бігової доріжки.
- 3) Початкове зрівноваження корпусу АБ забезпечує однакову балансувальну ємність

пристрою в будь-якому радіальному напрямку.

- 4) У порівнянні з іншими найбільші переваги мають кульові АБ з нерухомими і рухомими перегородками.
- 5) Рекомендується використовувати АБ для зрівноваження дисків, які розбалансовуються під час експлуатації не більше як на два класи точності за ГОСТ 22061-76 [8].

### Література

1. Агафонов Ю. В. Исследование ручных угловых шлифовальных машин под действием неуравновешенности шлифовальных кругов. — В кн.: Колебания и динамическая прочность элементов машин. М.: Наука, 1976, с. 130—135.
2. Агафонов Ю. В. Автоматическое балансирующее устройство для ручных шлифовальных машин // Вестник машиностроения. 1976.-№9. -С. 36-38.
3. Кладиев С.Н. Автобалансирующие устройства ручных шлифовальных машин: Автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. техн. наук: 01.02.06. - Томск, 1996. - 21 с.
4. Пашкова Л.А. Влияние автобалансирующих устройств на износ шлифовальных кругов и качество обрабатываемой поверхности: Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандт. техн. наук: 01.02.06. –Томск, 1999. -24 с.
5. Філімоніхін Г.Б. Зрівноваження і віброзахист роторів автобалансирами з твердими коригувальними вантажами. - Кіровоград: КНТУ, 2004. –352 с.
6. Філімоніхін Г.Б., Коваленко О.В. Розрахунок параметрів автобалансирів для зрівноваження дисків ручних шліфувальних машин // Загальнодержавний міжвідомчий н.-т. збірник "Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин", КНТУ, 2007. Вип. № 37.
7. ГОСТ Р 51376.4-99: Машины ручные. Измерение вибраций на рукоятках. Часть 4. Машины шлифовальные. - М.: ИПК Изд-во стандартов, 2000. - 12 с.
8. ГОСТ 22061-76. Машины и технологическое оборудование. Система классов точности и балансировки. - М.: Изд-во стандартов, 1984. - 134 с.